論文　光ファイバを用いたコンクリート構造物のひずみ管理に関する基礎的研究

松崎　謙太郎*1・勝木　太*2・矢島　哲司*3

要旨：本研究ではひずみセンサとして着目されている光ファイバをコンクリート補強材に一体化させ，コンクリート梁の鋼材ひずみ，ひび割れ幅などが測定できるかを実験的に検討した。まず基礎的実験として，光ファイバを一体化させた補強材の引張試験を行い，光ファイバで補強材のひずみを測定できるか検討した。さらに，コンクリート梁の曲げ試験を行い，光ファイバにより梁の鋼材ひずみ，曲げひび割れ幅が測定できるかを検討した。

その結果，引張試験では緊張材に発生するひずみを高い精度で計測できることが分り，梁の曲げ試験では鋼材ひずみ，曲げひび割れ幅を光ファイバで評価できることが分った。

キーワード：光ファイバ，BOTDR，ひずみ測定，ひび割れ幅，維持管理，非破壊試験

1.　はじめに

土木構造物が何らかの原因により損傷を受けた場合，損傷の程度および位置を早急に把握することはその後のメンテナンスや安全性，信頼性の面から非常に重要である。代表的な検査手法に目視点検があるが，土木構造物など広範囲にわたる点検には困難をきたす。また，構造物の変位，たわみを計測する手法にひずみゲージを利用する方法があるが，1 測点に往復 2～3 本のリード線が必要なため広範囲にわたって連続的なひずみ分布を測定するには計測システムが煩雑になり困難である。[1)]

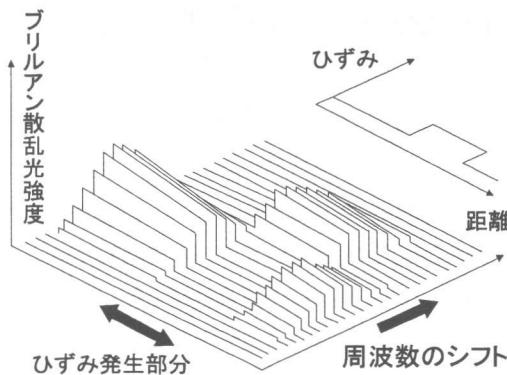
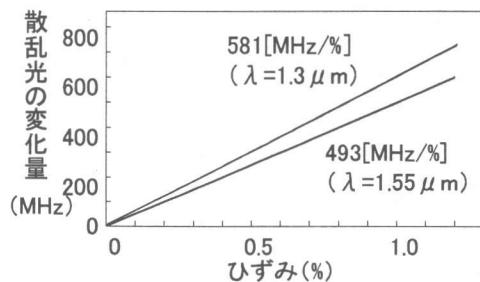
一方，光ファイバのひずみ検知能力を利用した新しい非破壊検査手法が着目されている。光ファイバは広範囲のひずみを連続的に測定でき，またその計測システムがシンプルであることから構造物のヘルスモニタリングに利用することが検討されている。

本研究では光ファイバをコンクリート補強材に一体化させることで，コンクリート梁の鋼材ひずみ，変位，ひび割れ幅のモニタリングが可能になるか検討した。

2.　BOTDR の測定原理

光ファイバに単色性の高い光を入射すると，光が伝搬する過程でそのエネルギーの一部が光ファイバ中に周期的な超音波（ガラスの密度揺らぎ）を発生させ，これにより入射光の一部が周波数を若干シフトさせながら散乱する。この散乱光をブリルアン（Brillouin）散乱光といい，入射光の波長が 1.55 μm の場合で約±11GHz, 1.3 μm の場合で約±13GHz 程度シフトする。

BOTDR（Brillouin Optical Time Domain Reflectometer）では光を入射してから散乱光が受信部で検出されるまでの遅延時間差を測定することによりひずみの発生位置を特定し，散乱光のパワースペクトルのシフト量からひずみの量の計測を行う（**図－1**）。このブリルアン散乱光の周波数シフトの変化量が散乱の発生する位置でのひずみや温度と比例関係にあるため，ひずみ係数を用いてひずみ値に換算することで光ファイバに生じているひずみを求めることができる[2−3)]（**図－2**）。本研究で使用した BOTDR の仕様を表－1 に示す。

*1　（株）千代田コンサルタント　（正会員）
*2　芝浦工業大学助教授　工学部土木工学科　工博　（正会員）
*3　芝浦工業大学教授　工学部土木工学科　工博　（正会員）

図－1　ブリルアン散乱光周波数分布

図－2　周波数シフトのひずみ依存性

表－1　BOTDR の仕様

距離レンジ		2 km
ひずみ表示範囲		-6.0 ～＋6.0 (%)
最小分解能	距離	5 cm
	ひずみ	0.0001 %
ひずみ測定範囲		3 %
光源パルス幅		10 ns
ダイナミックレンジ		4 dB
測定可能距離		10 km
距離分解能		1 m
ひずみ測定精度		±0.01 %

3.　直接引張試験

3.1　使用材料

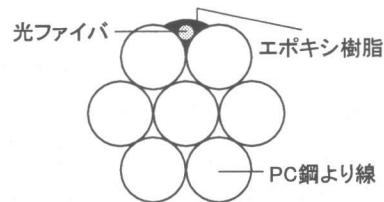
本研究で使用した補強材は PC 鋼より線とアラミドロッドの 2 種類であり，それぞれの力学的特性を表－2 に示す。なお表中の数値は、直接引張試験による実験値である。また，光ファイバはシングルモードの φ 1.0mm ナイロン被覆タイプのものを使用した。

表－2　補強材の力学的特性

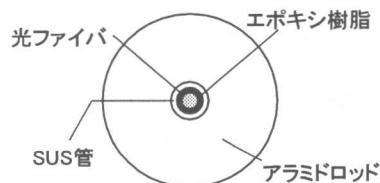
	PC鋼より線	アラミドロッド
外径 (mm)	15.2	7.88
断面積 (mm^2)	140.7	45.7
引張荷重 (kN)	272	81.2
伸び (%)	7.5	3.19
降伏荷重 (kN)	245	-
降伏強度 (N/mm^2)	1741.3	-
弾性係数 (kN/mm^2)	194.1	55.8

3.2　光ファイバの設置方法

(1) PC 鋼線より線タイプ

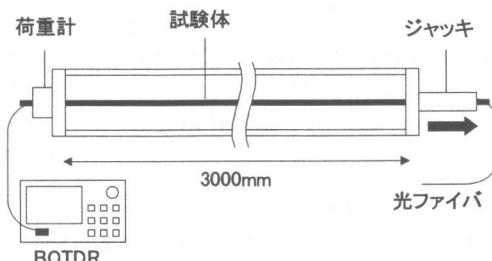
PC 鋼より線には，側線の凹部分に光ファイバがたわまないように若干の引張力を与えながらエポキシ樹脂で接着固定した (図－3)。なお，光ファイバがらせん状に設置されているため実験結果ではその補正を行った。

図－3　PC 鋼より線タイプの断面図

(2) アラミドロッドタイプ

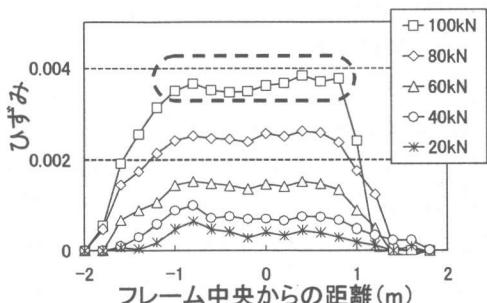
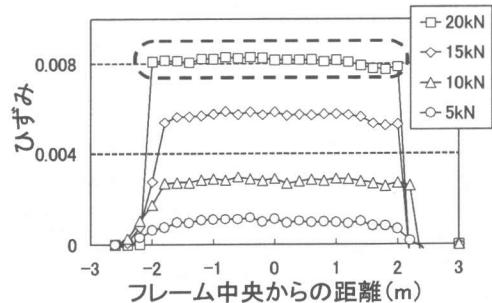
アラミドロッドタイプではロッド製作時にステンレス製 SUS 管が配置されているものを使用し，光ファイバをエポキシ樹脂で SUS 管内部に接着固定した (図－4)。

図－4　アラミドロッドタイプの断面図

3.3　直接引張試験方法

本試験において標準的な試験機は特に規定

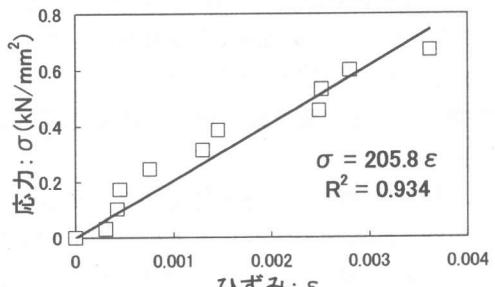
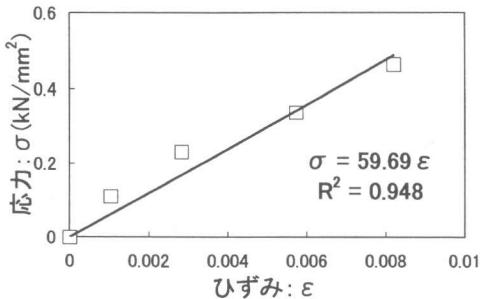
されてないため，H鋼等を組み合わせて製作した試験装置フレームにより引張試験を行った（**図－5**参照）。引張試験は**図－5**のようにセンターホールジャッキにより試験体に引張力を与え，荷重を圧縮センターホール型荷重計により，光ファイバに発生するひずみをBOTDRにより測定した。なおPC鋼より線タイプでは10kNの間隔で100kNまで，アラミドロッドタイプでは5kNの間隔で20kNまで引張力を与えた。また，BOTDRの距離分解能力が1.0mであることから，十分な長さにわたり引張力を与える必要があると考え，今回はフレームの長さを3.0mとした。

図－5　引張試験概要図

3.4　引張試験結果

PC鋼より線タイプおよびアラミドロッドタイプの引張試験について，ひずみ分布の測定結果を**図－6, 7**に示す。なお、図中の横軸は試験装置フレーム中央からの距離，縦軸は光ファイバに発生したひずみをBOTDRによって測定した結果である。

図－6　PC鋼より線タイプのひずみ分布

図－7　アラミドロッドタイプのひずみ分布

図より，引張力が作用している範囲において，光ファイバに発生したひずみ分布に等分布の領域が存在する。したがって，このひずみ分布が荷重ごとに上方向にシフトしていることから，図中の点線の部分（等分布領域）がそれぞれの引張力に対する鋼材ひずみとして評価できると考えられる。

なお，ひずみが小さいものについては台形の分布を示している。BOTDRによる光ファイバのひずみ測定において，ある測点のひずみが距離分解能である1.0mの部分の平均値として評価されるためである。

次に，PC鋼より線とアラミドロッドの実験より得られた応力－ひずみ曲線を**図－8, 9**に示す。図中において，横軸のひずみは光ファイバに発生した等分布領域のひずみを平均したもので，縦軸の応力は荷重計で計測された引張力をそれぞれの補強材の断面積で除したものである。なお併せて，実験値に対する近似直線を図中に示した。

図－8　PC鋼より線の応力－ひずみ関係

図－9　アラミドロッドの応力－ひずみ関係

上図より，光ファイバ測定による実験値はほぼ直線的な分布を示し，実験値に対する近似直線も良い相関関係が得られた。

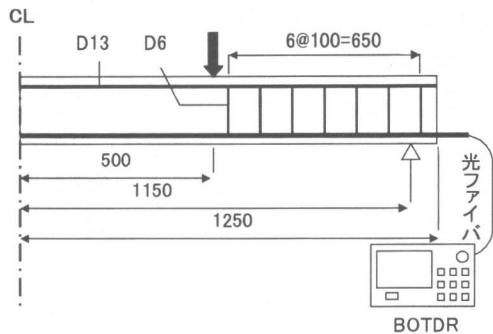
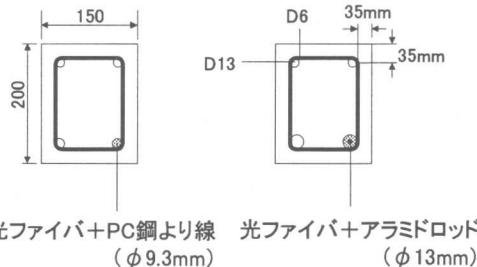
応力－ひずみ関係において直線の傾きは弾性係数を表すが，上図の近似直線より，実験から得られた弾性係数（E_{opt}）と**表－2**より別途試験から得られた弾性係数（E）との比（E_{opt}/E）は，PC 鋼より線タイプで 1.06，アラミドロッドタイプで 1.07 であった。したがって，今回行った光ファイバの設置方法により，緊張材に発生するひずみを高い精度で計測できることが分った。

4.　曲げ載荷試験

4.1　試験体

曲げ試験で使用した試験体の概要を図－10 に示す。試験体は，光ファイバを一体化させた PC 鋼より線とアラミドロッドをそれぞれ配置した梁（以下 PC 梁および AFRP 梁）の 2 種類である。なお，これらの補強材には緊張力を与えずに配筋した。

また配筋量の調節のため，引張側に設置した PC 鋼より線はφ9.3mm，アラミドロッドはφ13mm のものを使用したが，光ファイバは引張試験の場合と同様な貼り付け方法で設置した（**図－11**）。

なお，せん断スパン比（a/d）は 3.9 であるが，梁のせん断破壊を防ぐためスターラップによるせん断補強を行こない、曲げ破壊先行型の試験体とした。

図－10　試験体概要図

図－11　試験体断面図

4.2　試験方法

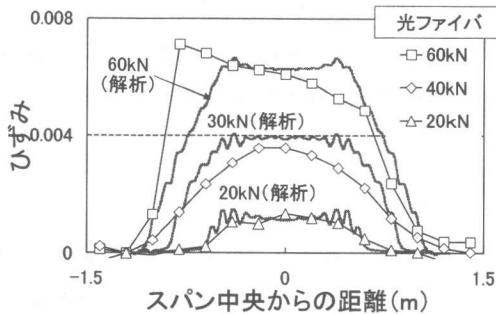
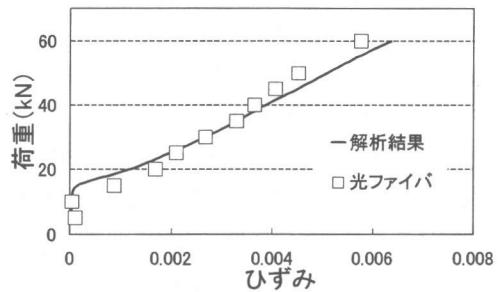
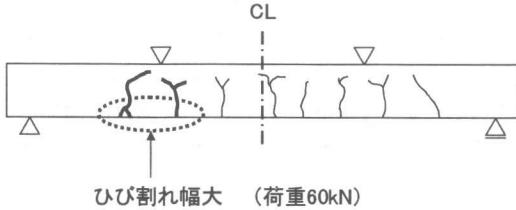
曲げ試験は，スパン 2300mm の単純支持の 2 点載荷で行った。PC 鋼より線，アラミドロッドに発生するひずみを BOTDR と光ファイバを用いて各荷重段階で 60kN まで測定した。なお，BOTDR の距離分解能が 1.0m であることから等モーメント区間を 1.0m とした。また，梁に生じたひび割れ幅を荷重ごとにクラックスケールで測定した。

4.3　解析

本研究では，実験値との比較および検討のために非線形の汎用解析プログラム（ATENA）による解析を行った。

4.4　実験結果

(1) PC 梁

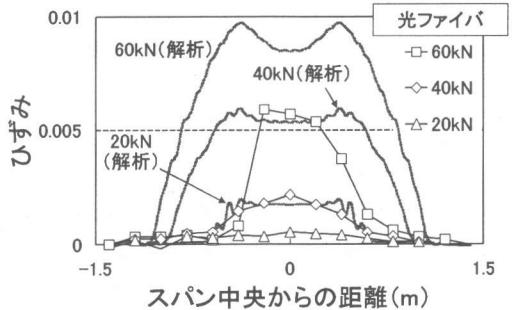
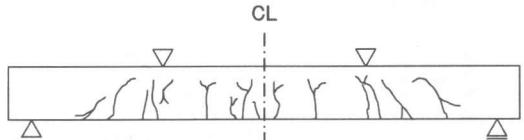
PC 鋼より線に一体化させた光ファイバより得られたひずみ分布および梁のひび割れ分布図を**図－12，13** に示す。横軸はスパン中央からの距離，縦軸はひずみを示した。さらに，解析による PC 鋼より線のひずみ分布を併せて示した。

図－12　PC梁の鋼材ひずみ分布

図－14　光ファイバの測定よるひずみと荷重の関係

図－13　PC梁のひび割れ分布図

上図より，光ファイバに発生したひずみ分布が荷重ごとに上方向にシフトし，解析によるひずみ分布とある程度の相関性を示していることが分る。また，2点載荷であるため解析によるひずみ分布は台形になっているのに対し，光ファイバによる分布は三角形に近い形状である。前述の引張試験同様，これはBOTDRの距離分解能が1.0mであり，ある測点のひずみは1.0mの部分の平均値として評価されるためである。

なお，荷重が60kNのときに左側の分布が大きい値を示しているが，これは支点付近のひび割れ幅が60kNのときに極端に大きくなったために鋼材の応力分担が局所的に増加したためだと考えられる（図－13）。

次に，光ファイバで測定されるスパン中央のひずみと同位置の解析値を比較したものを図－14に示す。図より，各荷重において光ファイバによるひずみと解析値とはほぼ一致している。したがって，コンクリート梁が曲げを受けるとき生じる鋼材の増加応力が光ファイバによって精度良く測定できることが分った。

(2) AFRP梁

AFRP梁について光ファイバによるひずみ分布および梁のひび割れ分布図を図－15, 16に示す。

図－15　AFRP梁のひずみ分布

図－16　AFRP梁のひび割れ分布図

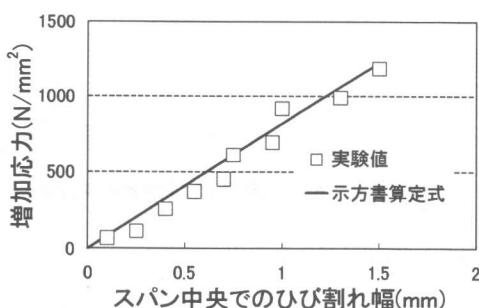
AFRP梁の光ファイバ測定によるひずみ分布は荷重ごとに上方向にシフトしているものの，ひずみ分布の形状が大きく異なり，また解析による分布と比較してもひずみが小さい。これは，試験載荷中にAFRP中のSUS管の抜け出しが生じたためだと考えられる。試験後に観察した結果でも，ロッド断面においてもその現象の確認ができた。一方，引張試験ではこのようなすべ

りは生じなかったが，今後はSUS管の外側にリブを付けるなどアラミドロッドとの付着を確実にする必要がある。

4.5 ひび割れの検討

次に，PC 梁に発生したひび割れについて，**図−17** にひび割れ幅とPC鋼より線の増加応力の関係を示す。図中には，横軸に曲げ試験においてスパン中央に発生した曲げひび割れ幅をクラックスケールで測定したものを，縦軸に光ファイバに発生したひずみから算出した鋼材の増加応力を実験値として示した。さらに，土木学会標準示方書に規定されているひび割れ算定式（1）を用いた鋼材応力とひび割れ幅の関係も併せて示した[4]。

$$w = k\{4c + 0.7(c_s - \phi)\}\left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{cs}\right] \quad (1)$$

k　：鋼材の付着性状を表す定数
c　：鉄筋のかぶり
c_s　：鋼材の中心間隔
ϕ　：鋼材径
σ_{se}：鋼材応力度の増加量（N/mm^2）
E_s　：鋼材の弾性係数（N/mm^2）
ε'_{cs}：乾燥収縮・クリープを考慮した定数で、今回は0とした。

図−17　ひび割れ幅と増加応力の関係

図より，実験による曲げひび割れ幅は標準示方書の算定式に非常に近い値を示した。したがって，今回行った曲げ試験の範囲では，光ファイバから得られたひずみから曲げひび割れ幅がある程度の精度で予測できるといえる。今後の課題としては，温度応力・収縮または環境外力による応力に起因するひび割れについて考慮する必要がある。

5. まとめ

(1) 引張試験より，今回行った設置方法で光ファイバを一体化することで補強材のひずみを光ファイバで精度良く測定できることが分った。
(2) PC梁の曲げ試験より，コンクリート中の鋼材ひずみを光ファイバで精度良く測定できることが明らかになった。
(3) 光ファイバの測定による鋼材の増加応力から，コンクリート梁に発生したひび割れ幅を評価できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，芝浦工業大学卒論生細野光彦氏，岸友洋氏，木藤裕子氏，高松武大氏に深く感謝いたします。

なお，本研究は平成 11，12 年度科学研究費補助金奨励研究（A）によって行ったことを付記する。

参考文献

1) 山本鎮男編：ヘルスモニタリング―機械・プラント・建設・土木構造物・医療の健全性監視―，共立出版，pp.30，1999
2) 倉嶋利雄，成瀬央，増田順一：光ファイバひずみ測定技術と構造物ひずみ分布測定への応用，光センシング技術の最新資料集，オプトロニクス社，pp.311−319，1998.12
3) 安藤電気株式会社：光ファイバ歪/損失アナライザ取扱説明書
4) コンクリート標準示方書［設計編］